نشریهٔ علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک
سال سی وسه، شمارهٔ دو، ۱٤۰۰(۲۲-۱)
DOI: 10.22067/jacsm.2022.74538.1083

# بررسی آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی تأثیر استفاده از مانع نوار تابیدهٔ منتخب بر عملکرد سیستم فتوولتاییک حرارتی*

**مقاله پژوهشی**

محمدرضا کلاته[1] علی کیانی‌فر [2] محمد سردارآبادی [3]

**چکیده** *تاکنون پژوهش‌های آزمایشگاهی زیادی در زمینهٔ قرار دادن انواع مانع جریان در کلکتور خورشیدی انجام شده‌است اما تأثیر استفاده از مانع نوار تابیده داخل کلکتور یک واحد فتوولتاییک حرارتی انجام نشده که برای اولین بار در این پژوهش به‌صورت آزمایشگاهی صورت می‌گیرد. ده نوع نوار تابیده برگرفته از تحقیقات پژوه شگران در گذ شته که دارای بالاترین کارایی ن سبت‌به سایر موانع جریان در داخل لوله بودند به‌منظور بررسی و تعیین بهترین نوار انتخاب شدند. باتوجه به هزینه‌های بالای مواد و لوازم مصرفی، تجهیزات مورد نیاز، تولید نوارهای تابیده و انجام آزمایش‌ها، بررســی نوارهای تابیدهٔ مذکور برای انتخاب بهترین نوار تابیده به‌صــورت عددی انجام خواهد شــد؛ لذا به‌منظور صــحه‌گذاری مدل‌ســازی عددی، بســتر آزمایشــگاهی برای انجام آزمایش‌های لولهٔ صــاف بدون/با نوار تابیدهٔ ســاده آماده گردید. پس از صحه‌گذاری مدل عددی، برر سی عددی ۱۰ نوع نوار تابیدهٔ منتخب (با ا شکال مختلف) در شرایط یک‌سان انجام و بهترین نوار تابیده (دارای بالاترین کارایی) انتخاب شــد. درنهایت، نوار تابیدهٔ منتخب در لوله‌های کلکتور( مدل هدر- رایزر) واحد فوتوولتاییک حرارتی جای‌گذاری و اثر آن به‌صورت آزمایشگاهی با شبیه‌ساز خورشیدی ارزیابی گردید.*

**واژه‌های کلیدی** انرژی خورشیدی، موانع جریان داخل لوله، نوار تابیده، نوار تابیدهٔ منتخب، فوتوولتاییک حرارتی.

## مقدمه

امروزه گرایش درجهت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌علت نگرانی‌های ایجادشده در زمینهٔ هزینهٔ سوخت‌های فسیلی و محدودیت‌های موجود برای منابع و از سوی دیگر مشکلات زیست‌محیطی که در صورت استفاده از این سوخت‌ها پدیدار می‌شود، افزایش پیدا کرده‌است [1,2].

## سامانهٔ فتوولتاییک حرارتی

واحدهای فتوولتاییک معمولاً حدود ۹۰ درصد از انرژی خورشیدی دریافتی را جذب می‌کنند [3,4] درحالی‌که بازده این سامانه‌ها بین ٤ تا ۱۷ درصد باتوجه به نوع سلول‌های خورشیدی و شرایط کارکرد، متغیر است [5]. پس بخش قابل توجهی از انرژی دریافتی به حرارت تبدیل می‌شود و درنتیجه دمای سلول‌های فتوولتاییک افزایش می‌یابد. این امر سبب افت ولتاژ مدار باز و درنتیجه کاهش بازده سامانه می‌شود [6].

هم‌چنین، افزایش دمای سلول‌های فتوولتاییک به ساختمان سلول آسیب می‌زند و عمر مفید آن را کاهش می‌دهد [7]. بنابراین خنک کردن واحدهای فتوولتاییک اهمیت زیادی دارد که به این منظور می‌توان از سامانه-های فتوولتاییک حرارتی استفاده کرد. سامانهٔ فتوولتاییک

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۰/۱۰/۱٤ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۰/۱۲/۱۱ می‌باشد.
(۱) دانشجو دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک
(۲) نویسنده مسئول، استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک
E-mail: a-kiani@um.ac.ir
(۳) استادیار، دانشگاه صنعتی قوچان ، دانشکده مهندسی، گروه انرژی

حرارتی ترکیبی از واحد فتوولتاییک معمولی و گردآورندهٔ حرارتی به‌منظور تولید هم‌زمان انرژی الکتریکی و حرارتی است. تولید هم‌زمان انرژی الکتریکی و حرارتی سبب کاهش فضای اشغال‌شده، کاهش دمای سلول‌های فتوولتاییک و درنتیجه افزایش طول عمر و نیز افزایش بازده کلی (مجموع الکتریکی و حرارتی) دستگاه می‌شود. هم‌چنین، تولید هم‌زمان انرژی الکتریکی و حرارتی از لحاظ اقتصادی نیز به‌صرفه‌تر است و بازگشت سرمایه در مدت زمان کوتاه‌تری انجام می‌پذیرد. از مهم‌ترین معایب استفاده از سامانه‌های فتوولتاییک حرارتی می‌توان به افزایش هزینهٔ تعمیر و نگهداری، امکان یخ‌زدگی سیال جاذب حرارت در شرایط آب و هوایی سرد اشاره کرد.

معادی و همکاران [8] در پژوهشی عددی اثر استفاده از موانع به شکل برگ مخروطی ( Conical-leaf inserts) در لوله‌های کلکتور یک صفحهٔ فوتوولتاییک حرارتی را بررسی کردند. به‌کار بردن مانع برگ مخروطی در لوله‌های کلکتور PVT سبب افزایش بازده حرارتی سیستم در حدود ۱۰/۲- ۱٤/۱ درصد و هم‌چنین بهبود بازده الکتریکی در بازهٔ ۰/۹- ۳/٤ درصد، نسبت‌به کلکتور بدون مانع شد.

## مانع نوار تابیده شده

در واحدهای کلکتور خورشیدی برای افزایش عملکرد سامانه، استفاده از پره، نوارهای تابیده، مارپیچ و یا شکل‌های متنوع دیگری درون لوله ارائه شده‌است [9,10]. در پژوهش حاضر برای اولین بار اثر استفاده از مانع نوار تابیدهٔ منتخب بر عملکرد سامانه های فتوولتاییک حرارتی به‌صورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.

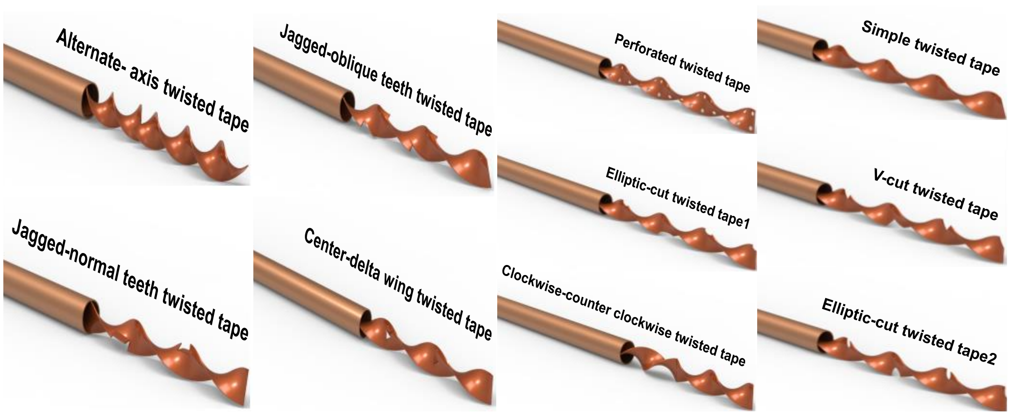
نوارهای تابیده در سیستم‌های خنک کاری به‌دلیل هزینهٔ کمتر، نصب آسان و عملکرد بالا نسبت‌به وسایل دیگر کاربرد بیشتری دارند [11,12]. این نوارها باعث ایجاد و یا افزایش جریان چرخشی در لوله می‌شود که این نیز سبب افزایش اختلاط سیال و مغشوش شدن لایهٔ مرزی حرارتی نزدیک دیواره می‌شود. با این حال، به‌دلیل اغتشاش زیاد در حضور نوار تابیده، افت فشار افزایش می‌یابد. این بدین معنی است که طراحی مناسب یک نوار تابیده به‌منظور بهبود کارایی سیستم بسیار لازم است. نوار تابیده انواع مختلفی دارد مانند: نوار تابیدهٔ سوراخ‌دار (Twisted tape perforated)، نوار تابیدهٔ شکاف‌دار (Notched)، سیم‌دار (Wired)، دارای بریدگی Vشکل (V-cut)، چند کاناله (Multi-channel)، با محور متغیر (With alternative axis)، دندانه‌دار (Serrated)، خوشه‌ای آج‌دار ( Ribbed spiky)، با حلقه‌های دایره‌ای (Wth circular-rings)، استگرد (Staggered) و چندتایی (Multiple) [13].

استفاده از نوارهای تابیده با هندسه‌های مختلف در پژوهش‌های متعددی بررسی شده‌است. در جدول (۱) مقدار کارایی چندین مدل مانع گردآوری شده‌است.

طبق جدول (۱) باتوجه به کارایی بالای نوارهای تابیده به‌دلیل ایجاد جریان‌های ثانویه و چرخشی و هم‌چنین تخریب لایهٔ مرزی در سیال عامل، به‌طور گسترده‌ای در زمینهٔ بهبود انتقال حرارت استفاده می‌شوند. تاکنون پژوهش آزمایشگاهی در زمینهٔ انتخاب بهترین نوار تابیده پس از مقایسه‌ای جامع بر روی انواع نوارهای تابیده صورت نگرفته‌است؛ لذا نوآوری این پژوهش از مقایسهٔ ده نوار تابیده برگزیده از مطالعات پیشین در شرایط کاری یکسان و تعیین نوار تابیدهٔ منتخب از بین ده نوار تابیدهٔ مذکور می‌باشد.

جدول ۱ برخی از انواع موانع به‌کاررفته در پژوهش‌های مختلف و مقایسهٔ آن‌ها

| نویسندگان | نوع آشفتگی جریان | مقدار کارایی |
|---|---|---|
| بحیرایی و همکاران [۱٤] | مانع نوار مخروطی تابیده | ۰/٦۲ تا ۱/۲۹ |
| دات و همکاران [۱۵] | مانع نوار تابیدهٔ حلقه‌دار | ۱/۲ تا ۲/۷۵ |
| لیو و همکاران [۱٦] | مانع بالهٔ مثلثی شکل | ۰/۸۲ تا ۱/۱۷ |
| صادقی و همکاران [۱۷] | مانع نوار مارپیچ | ۰/۸ تا ۱/۱۸ |
| چانگ و همکاران [۱۸] | نوار تابیدهٔ چهارتایی با میلهٔ مرکزی | ۱/٤۸ تا ۲/۹۲ |
| اسکالانگ و همکاران [۱۹] | مانع نوار سوراخ‌دار و باله‌دار | ۱/۲۳ تا ۱/۷۲ |
| لیو و همکاران [۲۰] | مانع نوار تابیدهٔ منقطع (فاصله‌دار) | ۰/۸۹ تا ۱/۰۲ |
| مقدس‌زاده [۲۱] | مانع نوار گریزنده از مرکز | ۱/۲۵ تا ۲/۲ |
| هوانگ و همکاران [۲۲] | مانع متخلخل | ۰/۸۱ تا ۱/۲٦ |
| عبدالحمید و همکاران [۲۳] | مانع سیم‌پیچ مفتولی | ۱/۱۷ تا ۲/۱۱ |
| پتکول و همکاران [۲٤] | فرورفتگی و برآمدگی روی لوله | ۱ تا ۲/۳٤ |
| چانگ و همکاران [۲۵] | مانع صفحه‌ای با بافل‌های سوراخ‌دار | ۱ تا ۳/٤ |
| کومار و همکاران [۲٦] | مانع با حلقه‌های توری | ۱/۲۲ تا ۳/٤٤ |
| گناناول و همکاران [۲۷] | مانع فنر مارپیچ | ۰/۷ تا ۱/٦۸ |




شکل ۱ موانع نوار تابیدهٔ استفاده‌شده در مدل‌سازی

## اهداف پژوهش

این پژوهش به دو بخش کلی اول و دوم تقسیم‌بندی می‌شود.

## بخش اول پژوهش

این بخش به دو قسمت زیر تقسیم می‌شود:

۱. استفاده از مدل آزمایشگاهی و عددی به‌منظور ارزیابی مشخصه‌های انتقال حرارتی سیال عامل گذرنده از لولهٔ صاف با و بدون نوار تابیدهٔ ساده. نتایج عددی با یافته‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی می‌شوند. هم‌چنین نتایج آزمایشگاهی با روابط شناخته‌شدهٔ موجود برای رژیم جریان آرام سیال مقایسه می‌گردد.

۲. تأثیر ده نوار تابیدهٔ مختلف مطابق شکل (۱) (ساده، سوراخ‌دار، دارای بریدگی v شکل، دارای بریدگی

بیضوی ۱ (Elliptic cut)، دارای بریدگی بیضوی ۲، ساعتگرد- پادساعتگرد (Clockwise- counter clockwise)، دارای بریدگی دندانه‌مورب (Jagged oblique teeth)، دارای بریدگی دندانه‌عمودی (Jagged normal teeth)، دارای بریدگی بال دلتاشکل در مرکز (consisting of centre wings) و محور متناوب (Alternate axis)) بر سه پارامتر مهم از قبیل عدد ناسلت متوسط Nu، ضریب اصطکاک f و کارایی TPF بااستفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار انسیس فلوئنت بررسی می‌شود.

درنهایت نوار تابیده با بیشـــترین مقدار کارایی به‌عنوان مانع منتخب تعیین می‌شود.

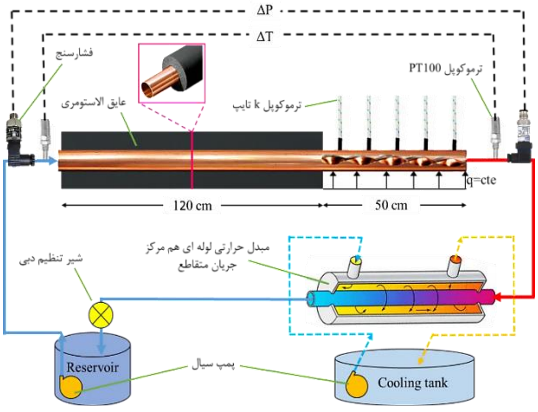
## بخش دوم پژوهش

این بخش از پژوهش به تو صیف د ستگاه آزمایشگاهی ا ستفاده شده برای تحلیل و ارزیابی اثر ا ستفاده از مانع منتخب بر عملکرد دســـتـگـاه فتوولتـاییـک حرارتی می‌پردازد.

## روش آزمایشگاهی

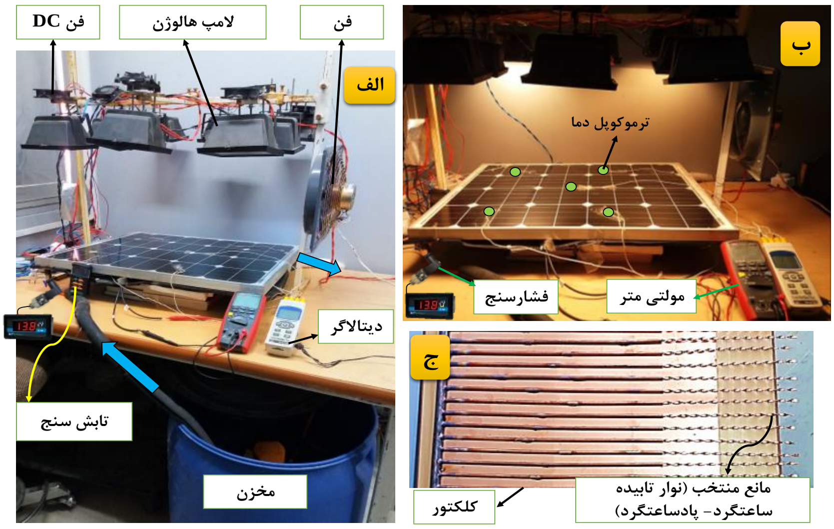
***بخش اول.*** بدین منظور بستر آزمایش به‌منظور بررسی تأثیر استفاده از مانع بر انتقال حرارت و جریان سیال در یک لوله و هم‌چنین اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی عددی ساخته می‌شود.

شکل (۲) شماتیکی از بستر آزمایشگاهی بخش اول را نشان می‌دهد. ابتدا آب خالص از مخزن تو سط پمپ به داخل لولهٔ مسی هدایت می‌شـود. قسـمتی از لوله به طول نیم متر تحت شــار حرارتی ثابت قرار می‌گیرد. بـدین منظور از ســیم حرارتی برای ایجـاد حرارت استفاده می‌شود. به این صورت که این سیم به دور لولهٔ مسی پیچیده می شود. طبق محاسبات حداکثر ۱/۲ متر طول لوله نیاز است که جریان سیال به حالت توسعه‌یافتگی هیدرودینامیکی برسد، پس طول ۱/۷ متر برای لولهٔ مسی درنظر گرفته می شود. آب پس از ورود به لوله و با توسعه یافته شدن هیدرودینامیکی، از دیوارهٔ لوله حرارت دریافت می‌کند و دمای آن بالا می‌رود. در ورودی و خروجی لولهٔ مسـی، دما و فشـار اندازه‌گیری می‌شــود. هم‌چنین در قسـمتی از لوله که شـار حرارتی اعمال می‌گردد دما در پنج نقطه با فواصل تقریباً یکسان و ثابت اندازه‌گیری می شود. آب خروجی از لولهٔ مسی که دمای آن بالا رفته قبل از ورود مجدد به مخزن ۱ ابتدا از درون یک مبدل لوله‌ای هم‌مرکز عبور داده می‌شود تا به دمای مخزن برسد.

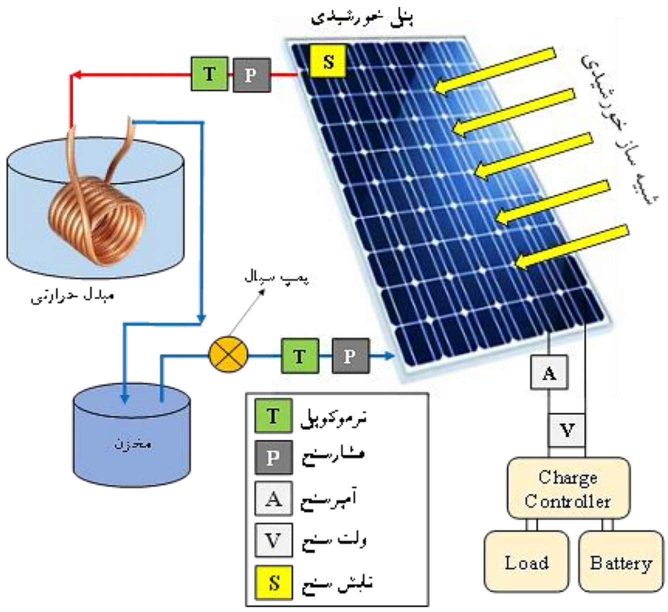



شکل ۲ شکل شماتیک بستر آزمایشگاهی بخش اول

***بخش دوم.*** در این بخش از پژوهش، سه دستگاه مختلف برای بررسی و انجام آزمایش‌ها طراحی و ساخته می‌شوند. دستگاه اول یک واحد فتوولتاییک معمولی است که بدون سیستم خنک‌کاری می‌باشد. دستگاه دوم یک واحد فتوولتاییک حرارتی با سیال خنک‌کنندهٔ آب است که از درون یک گردآورنده جمع‌کننده- پخش‌کننده (هدر- رایزر) که در زیر صفحهٔ فتوولتاییک نصب شده‌است عبور می‌کند. دستگاه سوم همانند دستگاه دوم می‌باشد با این تفاوت که درون لوله‌های گردآورندهٔ آن، مانع منتخب در تحلیل عددی تولید و سپس جای‌گذاری می‌گردد. بستر واقعی و شماتیک آزمایشگاهی در شکل‌های (۳) و (٤) قابل مشاهده می‌باشد. تمامی تست‌ها در محیط آزمایشگاه توسط دستگاه شبیه‌ساز خورشیدی انجام شد. دمای آزمایشگاه در تمامی حدوداً ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد می‌باشد.




شکل ۳ بستر آزمایشگاهی بخش دوم پژوهش




شکل ٤ شکل شماتیک بستر آزمایشگاهی بخش دوم

## روابط تحلیل انرژی

### تحلیل انرژی بخش اول

میزان شار حرارتی که از طریق سیم حرارتی به سطح خارجی لولهٔ مسی در ناحیهٔ اعمال شار وارد می شود، به صورت الکتریکی از رابطهٔ (۱) محاسبه می شود و از طرف دیگر میزان شار دریافتی توسط سیال نیز از رابطهٔ (۲) به‌دست می‌آید.

$$q''_{el} = \frac{VI}{A_p} = cte \qquad (۱)$$

$$q''_{th} = m\&C_p = \left(T_{b,o} - T_{b,i}\right)/A_p \qquad (۲)$$

دمای متوسط حجم سیال در هر فاصله از ابتدای لوله از رابطهٔ (۳) به‌دست می‌آید و سپس بااستفاده از

رابطهٔ (٤) با داشتن دمای متوسط حجم سیال و دمای اندازه‌گیری‌شده از سنسورهای دما روی جدارهٔ لولهٔ مسی، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محاسبه می‌گردد.

$$T_b(x) = \frac{q''_{th}.\ px}{m\&C_p} + T_{b,i} \qquad (٣)$$

$$h(x) = \frac{q''_{th}}{[T_s(x) - T_b(x)]} \qquad (٤)$$

باتوجه به این‌که لولهٔ مسی با ضریب انتقال حرارت هدایتی بالا و ضخامت جدارهٔ ۰/۹ میلی‌متر انتخاب شده‌است، لذا اختلاف دمای جدارهٔ داخلی و خارجی لوله بسیار کوچک و طبق محاسبات کمتر از ۰/۰۱ درجهٔ سانتی‌گراد می‌باشد. عدد ناسلت موضعی در هر فاصله از ابتدای لوله از رابطهٔ (٥) محاسبه می‌شود و هم‌چنین مقدار میانگین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نیز از رابطهٔ (٦) به‌دست می‌آید.

$$Nu(x) = h(x).D/k \qquad (٥)$$

$$h_{ave} = \frac{1}{L}\int_0^L h(x)\,dx \qquad (٦)$$

که در این رابطه k هدایت حرارتی سیال و D قطر لوله است. برای محاسبهٔ افت فشار نیز می‌توان نوشت:

$$\Delta P = f\frac{L}{D}\left(\frac{\rho u^2}{2}\right) \qquad (٧)$$

در این رابطه u سرعت متو سط سیال، ρ چگالی، L طول لوله و f ضـــریب اصـــطکاک اســـت. ضـــریب اصـــطکاک و عدد رینولدز برای جریان آرام در داخل لولهٔ صاف از روابط (٨) و (٩) به‌دست می‌آیند:

$$f = \frac{64}{Re} \qquad (٨)$$

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi d\mu} = \frac{\rho Vd}{\mu} \qquad (٩)$$

برای مقایسهٔ بهتر عملکرد لوله‌های صاف با انواع جریان‌ها و موانع مختلف، متغیری تحت عنوان کارایی طبق رابطهٔ (٩) تعریف می‌شود.

$$TPF = \frac{\frac{Nu}{Nu_{ref}}}{\left(\frac{f}{f_{ref}}\right)^{\frac{1}{3}}} \qquad (١٠)$$

به‌منظور محاسبهٔ عدد ناسلت تحلیلی برای سیال عامل آب با شرط مرزی دیواره با شار حرارتی ثابت، از رابطهٔ (١١) معروف به رابطهٔ شاه [28] برای انتقال حرارت درحال توسعه و جریان توسعه‌یافتهٔ هیدرودینامیکی و آرام در لولهٔ صاف استفاده شده‌است.

$$Nu_{x^*} = \left\{\begin{matrix} 1.302x^{*-\frac{1}{3}} - 1 & x^* \le 0.00005 \\ 1.302x^{*-\frac{1}{3}} - 0.5 & 0.00005 < x^* < 0.0015 \\ 4.364 + 8.68(10^3x^*)^{-0.506}e - 41x^* & x^* > 0.0015 \end{matrix}\right\} \qquad (١١)$$

$$Nu_{x^*} = \frac{x/D}{Re.Pr} \qquad (١٢)$$

## تحلیل انرژی بخش دوم

با در نظر گرفتن واحد فتوولتاییک حرارتی به‌عنوان یک حجم کنترل و با فرض پایا بودن جریان، معادلات انرژی به شکل زیر تبدیل می‌شوند [8]:

$$\sum\dot{\mathbf{E}}_{\mathbf{in}} = \sum\dot{\mathbf{E}}_{\mathbf{out}} + \sum\dot{\mathbf{E}}_{\mathbf{lost}} \qquad (١٣)$$

$$\dot{E}_{sun} + \dot{E}_{mass,in} = \dot{E}_{el} + \dot{E}_{mass,out} + \dot{E}_{loss} \qquad (١٤)$$

در معادلات فوق $\dot{E}_{in}$، $\dot{E}_{out}$ و $\dot{E}_{loss}$ نشـــان‌دهندهٔ نرخ انرژی ورودی، خروجی و هدررفته است. هم‌چنین $\dot{E}_{sun}$ بیانگر نرخ انرژی تابـشی جذب شده ا ست که از رابطهٔ زیر تعیین می‌شود:

$$\dot{E}_{sun} = \mathbf{A_c}\ \alpha_{pv}\ \dot{G}_{sun} \qquad (١٥)$$

پارامتر $A_c$ ســـطح مقطع فتوولتاییک در معرض خورشید می‌باشد. هم‌چنین توان حرارتی خروجی طبق معادلهٔ زیر محاسبه می‌شود [28]:

$$\dot{E}_{th} = \dot{E}_{mass,out} - \dot{E}_{mass,in} = \dot{m}_f\ C_{P,f}\left(T_{f,out} - T_{f,in}\right) \qquad (١٦)$$

در معادلهٔ (١٦)، $\dot{m}_f$ دبی جرمی جریان سیال، $C_{p,f}$ ظرفیت گرمای ویژهٔ ســـیال عامل، $T_{f,in}$ و $T_{f,out}$ نیز

به‌ترتیب بیانگر دمای متوسط سیال در مقاطع ورودی و خروجی از کلکتور است.

در آزمایش‌های تجربی توان الکتریکی خروجی دستگاه فوتوولتاییک $\dot{E}_{el}$ بااستفاده از معادلۀ زیر تعیین می‌شود [30]:

$$\dot{E}_{el} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \quad (۱۷)$$

در معادلۀ (۱۸)، $V_{OC}$ نشان‌دهندۀ ولتاژ مدارباز و $I_{SC}$ نیز نشان‌دهندۀ جریان اتصال کوتاه واحد فتوولتاییک است. هم‌چنین FF ضریب انباشتگی است که از طریق رابطۀ زیر محاسبه می‌گردد [30]:

$$FF = \frac{(V \times I)_{max}}{V_{OC}^{*} \times I_{SC}^{*}} \quad (۱۸)$$

در معادلۀ فوق، $V_{OC}^{*}$ ولتاژ مدارباز است و $I_{SC}^{*}$ نیز بیانگر جریان اتصال کوتاه است که توسط کارخانۀ تولیدکننده در شرایط استاندارد آزمایشگاهی مشخص می‌شود.

انرژی موردنیاز پمپ نیز از طریق معادلۀ (۱۹) به‌دست می‌آید [29]:

$$\dot{E}_{p} = \frac{\dot{m}_f \Delta P}{\rho_f \eta_p} \quad (۱۹)$$

در معادلۀ بالا، $\Delta p$ نشانگر افت فشار سیال گذرنده از کلکتور و $\eta_p$ بازده پمپ است. بازده الکتریکی و حرارتی و کلی دستگاه فتوولتاییک حرارتی توسط معادلات (۲۰) تا (۲۲) به‌دست می‌آید [29].

$$\eta_{el} = \frac{\dot{E}_{el} - \dot{E}_{p}}{\dot{E}_{sun}} \quad (۲۰)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{E}_{th}}{\dot{E}_{sun}} \quad (۲۱)$$

$$\eta_{ov} = \frac{\dot{E}_{el} - \dot{E}_{p}}{\dot{E}_{sun}} + \dot{E}_{th}\left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{f,in}}\right) \quad (۲۲)$$

## عدم قطعیت

محاسبه و تحلیل عدم قطعیت از جمله قدم‌های مهم در تحقیقات آزمایشگاهی به شمار می‌رود. برای محاسبه عدم قطعیت آزمایشات حداقل دو مرتبه باید تکرار شوند. جهت محاسبه عدم قطعیت کلی از دو عدم قطعیت ابزار و عدم قطعیت در اثر تکرار آزمایش طبق رابطۀ (۲۳) استفاده می‌شود. عدم قطعیت توسعه‌یافته از رابطۀ (۲٤) و با اعمال ضریب پوشش ($K_u$) برابر ۲ تعیین می‌شود. همچنین عدم قطعیت توابع (مثلاً تابع دل‌خواه R) از رابطۀ (۲۵) مشخص می‌شود.

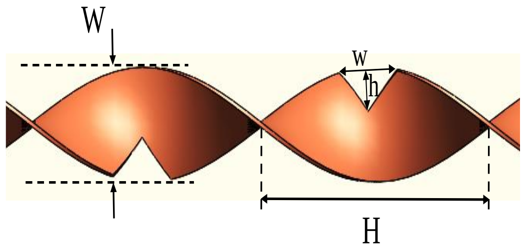
$$u_{total} = \sqrt{(u_{tools})^2 + (u_{repetition})^2} \quad (۲۳)$$

$$U = K_u \cdot u_{total} \quad (۲٤)$$

$$\partial R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial u_1}\delta u_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial u_2}\delta u_2\right)^2 + \ldots + \left(\frac{\partial R}{\partial u_n}\delta u_n\right)^2} \quad (۲۵)$$

جدول ۲ دقت تجهیزات اندازه‌گیری و عدم قطعیت متغیرها

| نام تجهیز | مدل/ نام تجاری | دقت | متغیر اندازه‌گیری | عدم قطعیت کلی |
|---|---|---|---|---|
| زمان‌سنج | کرنومتر | ۰/۰۱ (s) | $\dot{V}(mLs^{-1})$ | 0.049 |
| استوانۀ مدرج | ارلن | ۰/۱ (ml) | | |
| ترموکوپل دمای سطح | تیپ k | ۰/۱ (°C) | $T_s(x)(\circ C)$ | 0.066 |
| ترموکوپل دمای سیال | PT100 | ۰/۱ (°C) | $T_{b,i}(\circ C)$ $T_{b,o}(\circ C)$ | 0.031 |
| فشارسنج | Atek | ۰/۱ (mbar) | f | 0.029 |
| مولتی‌متر ولتاژ | UT71D | ۰/۱ (volt) | V(volt) | 0.068 |
| مولتی‌متر جریان | UT71D | ۰/۰۱ (A) | I(A) | 0.006 |
| تابش‌سنج | Pyranometer-TES133 | ۱ (W/m²) | $\dot{G}(W/m^2)$ | 0.021 |




شکل ۵ ابعاد مانع نوار تابیده

## مدل‌سازی عددی

### روابط تحلیلی

در این قسمت در ابتدا به مطالعه بر روی لوله در دو حالتِ با و بدون مانع نوار تابیدهٔ ساده به‌کمک برنامه تجاری فلوئنت پرداخته و سپس نتایج مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی و روابط تئوری اعتبارسنجی می‌شود.

در تمامی نوارهای تابیده برای مدل‌سازی شروط زیر برقرار است (شکل۵): ID: قطر داخلی لوله ۷٫۷۱ mm، H: نصف طول گام پیچش ۲٤ mm، Y= H/ID = 3.1، W: عرض نوار تابیده ۷/۱ mm ، t: ضخامت نوار ۰/۹ mm، d: قطر سوراخ تخلخل، w: عرض برش، h: عمق یا ارتفاع برش، B: زاویهٔ حملهٔ بال، نسبت تخلخل ٤/٥ ٪ ، B= 75 درجهٔ زاویه، نسبت‌های قطر سوراخ، عرض و عمق یا ارتفاع برش‌ها به عرض نوار تابیده برابر با ۰/۳ می‌باشد.

تعداد پیچش‌های نوار تابیدهٔ محور متناوب ۱۳ می‌باشد. هم‌چنین در نوار تابیدهٔ ساعتگرد- پادساعتگرد زاویهٔ تماس بخش ساعتگرد به پادساعتگرد صفر درجه و تعداد آن‌ها یک می‌باشد.

در این پژوهش سیال عبوری از لولهٔ آب می‌باشد. معادلات حاکم مربوط به این رژیم سیال به شکل زیر ارائه می‌شود [31]:

پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \qquad (۲٦)$$

معادلات مومنتوم:

$$\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)= \rho g_x-\frac{\partial p}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \qquad (۲۷)$$

$$\rho\left(u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)= \rho g_y-\frac{\partial p}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \qquad (۲۸)$$

$$\rho\left(u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)= \rho g_z-\frac{\partial p}{\partial z}+\mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \qquad (۲۹)$$

معادلهٔ انرژی:

$$u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z}=\alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \qquad (۳۰)$$

برای شرایط مرزی نیز در ورودی لوله، سیال آب با دبی جرمی ثابت وارد و مقدار آن مشخص می‌باشد. هم‌چنین شرط دبی خروجی ثابت (out flow) در خروجی لوله برقرار است. دما در ورودی کانال مقداری ثابت دارد و در خروجی لوله نیز مقدار دما باتوجه به فرمول سرمایش نیوتون قابل محاسبه است (باتوجه به این‌که مقدار حرارت ورودی به آب با اعمال شار ثابت بر روی سطح خارجی لوله در طول ۵۰ سانت انتهای خروجی لوله مشخص می‌باشد). نهایتاً، فشار ثابت (فشار محیط) شرط فشار در خروجی لوله می‌باشد.

باتوجه به مدل‌سازی لوله‌های با مانع که ممکن است سبب تغییر رژیم جریان از آرام به آشفته شود، لذا مدل آشفته SST k-ε [35] که تغییرات جریانی در رینولدزهای پایین را پوشش می‌دهد استفاده شده‌است. مطابق با مدل‌سازی‌های انجام‌شده در پژوهش معادی و همکاران [36]، خطای مدل‌سازی بین مدل جریان آرام و مدل آشفته SST k-ε به‌ترتیب برای بازده‌های الکتریکی و حرارتی یک واحد فوتوولتاییک حرارتی

۰/۱ و ۰/۲ درصد می‌باشد. بنابراین استفاده از مدل جریان آرام در این پژوهش معقول و قابل اعتماد می‌باشد.

### استقلال از شبکه

در ادامه به‌منظور اعتبارسنجی، مدل‌های عددی در دبی ۷۲ میلی لیتر بر ثانیه و شار حرارتی ثابت ۱۳۸۰ وات بر مترمربع، شبیه‌سازی و با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. به همین منظور پیش از شروع شبیه‌سازی عددی، لوله بدون مانع و با مانع با ۷ شبکهٔ محاسباتی مختلف مورد بررسی استقلال از شبکه قرار گرفت. مطابق جدول (٤)، برای لوله با مانع نوار تابیده تعداد سلول ۱۹۰۰۰۰۰ به‌عنوان شبکهٔ نهایی برای ادامهٔ کار مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ٤ استقلال از شبکهٔ مدل لوله با مانع نوار تابیده در دبی ورودی ۷۲ میلی‌لیتر بر ثانیه

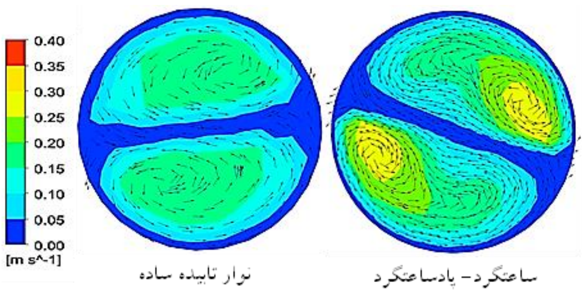
| تعداد شبکه | ناسلت میانگین | ضریب اصطکاک |
|---|---|---|
| 450000 | 23.1854 | 0.5958 |
| 850000 | 22.9564 | 0.5885 |
| 1230000 | 22.8428 | 0.57254 |
| 1900000 | 22.5324 | 0.55751 |
| 2500000 | 22.5335 | 0.55762 |
| 3500000 | 22.5346 | 0.55975 |

شبیه‌سازی عددی مورد استفاده در این پژوهش بااستفاده از حل معادلات ناویر استوکس به‌صورت جریان سه‌بعدی و پایا در نرم‌افزار انسیس فلوئنت نسخهٔ ۱۹/۲ انجام پذیرفت. معادلات ناویر استوکس از طریق گسسته‌سازی حجم کنترل در دامنهٔ محاسباتی، حل خواهند شد. در این پژوهش از حلگر فشار مبنا و برای محاسبهٔ شار از الگوریتم سیمپل و هم‌چنین مدل جریان آرام استفاده شده‌است. حل به‌صورت حجم کنترل و دقت تمامی معادلات، از مرتبهٔ دوم انتخاب شد. معیار هم‌گرایی برای پیوستگی، مؤلفه‌های سرعت و غیره، رسیدن باقی‌ماندهٔ حل به کمتر از $۱۰^{-۷}$ در نظر گرفته شده‌است.

### اعتبارسنجی

استفاده از نوار تابیده با افزایش جریان ثانویه باعث بهبود انتقال حرارت می‌شود. نویسندگان با تغییر هندسهٔ موانع نوار تابیدهٔ مختلف که قبلاً معرفی شدند به دنبال آن هستند که شدت این جریان ثانویه یا به عبارتی دیگر ضریب انتقال حرارت را بهبود ببخشند که شکل (٦) گواه این مطلب می‌باشد. با تغییر هندسهٔ نوار تابیده ساده به نوار تابیدهٔ ساعتگرد- پادساعتگرد، اثرجریان ثانویه افزایش پیدا کرده‌است.

مقایسهٔ نتایج حل‌های تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی برای لولهٔ صاف بدون مانع در جدول (۵) آمده‌است. همان‌طور که انتظار می‌رود تفاوت بین حل تحلیلی و عددی بسیار کم است و بیشترین خطا دارای مقدار ۱/۹۵ درصد است. هم‌چنین در قسمت آزمایشگاهی سعی شده که بستر آزمایشگاهی بسیار دقیق و با کمترین خطا تهیه گردد؛ لذا میانگین خطای حدودی ۱/۸۳ درصد بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی رؤیت می‌شود که قابل قبول است.




شکل ٦ جریان ثانویه در دو مانع نوار تابیدهٔ ساده و ساعتگرد- پادساعتگرد در فاصلهٔ ١٤٥٣ میلی‌متر از ابتدای لوله

جدول ٥ مقایسهٔ عدد ناسلت متوسط نتایج تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی در ٤ مکان مختلف و در شار حرارتی ۱۳۸۰ وات بر مترمربع و رینولدز ۱۸٤٤ برای لولهٔ صاف بدون مانع

| X (m) | Nu دقیق | Nu آزمایشگاهی | Nu عددی | Ex/ Nu Er% | Sim/ Nu Er% |
|---|---|---|---|---|---|
| 1.245 | 16.35 | 16.64 | 16.23 | 1.750 | 0.743 |
| 1.348 | 10.62 | 10.89 | 10.51 | 2.490 | 1.054 |
| 1.453 | 8.91 | 8.83 | 8.82 | 0.846 | 0.999 |
| 1.554 | 8.02 | 7.86 | 8.18 | 2.059 | 1.947 |

جدول ٦ عدد ناسلت متوسط آزمایشگاهی در شارهای حرارتی مختلف در رینولدز ۱۸٤٤ و مقایسهٔ آن با ناسلت رابطهٔ تحلیلی برای لولهٔ بدون مانع (در فاصلهٔ ۱۵۵/٤ سانتی‌متر از ابتدای لوله)

| $2700W/m^2$ | $1850W/m^2$ | $1380W/m^2$ | $900W/m^2$ | تحلیلی |
|---|---|---|---|---|
| 8.80 | 8.83 | 8.74 | 8.52 | 8.07 |

جدول ۷ مقایسهٔ ناسلت متوسط نسبی، ضریب اصطکاک نسبی و کارایی برای لوله با مانع نوار تابیدهٔ ساده (آزمایشگاهی)

| | Re | ۱۸٤٤ | ۱۳۲۷ | ۷۳۷ | ۵۳۵ |
|---|---|---|---|---|---|
| آزمایشگاهی | $Nu_{insert}/Nu_{smooth}$ | ۲/۳۲ | ۲/۲۷ | ۲/۳٦ | ۲/۷۲ |
| | $f_{insert}/f_{smooth}$ | ۱۳/٤۳ | ۱۲/۲۱ | ۱۰/۱۹ | ۷/۵۰ |
| | TPF | ۰/۹۸ | ۰/۹۹ | ۱/۰۹ | ۱/۳۹ |
| عددی | $Nu_{insert}/Nu_{smooth}$ | ۲/۲۰ | ۲/٤٦ | ۲/۸٦ | ۳/۰۰ |
| | $f_{insert}/f_{smooth}$ | ۱۲/۲٦ | ۱۱/۰۳ | ۱۰/۳٦ | ۸/۱٤ |
| | TPF | ۰/۹۵ | ۱/۱۰ | ۱/۳۱ | ۱/٤۹ |

## نتایج و بحث

### نتایج آزمایشگاهی

نتایج آزمایشگاهی عدد ناسلت متوسط مربوط به لولهٔ صاف بدون مانع در جریان با عدد رینولدز ۱۸٤٤ در شارهای حرارتی مختلف و هم‌چنین در فاصلهٔ ۱۵۵/٤ سانتی‌متر از ابتدای لوله در جدول (٦) ارائه و با نتایج رابطهٔ تحلیلی شاه (رابطهٔ ۱۰) مقایسه شده‌است. باتوجه به این‌که عدد ناسلت متوسط با تغییر شار حرارتی و تغییرات ناچیز دمای سیال تغییر نمی‌کند، بنابراین ناسلت متوسط آزمایشگاهی نیز باید در شارهای مختلف مقادیر تقریباً یکسانی داشته باشد. طبق جدول (٦) حداکثر خطای حدوداً ۹/۱ درصد در شار حرارتی ۲۷۰۰ وات بر مترمربع با نتایج تحلیلی مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از نحوهٔ اتصال سنسور ترموکوپل با سطح لوله و یا خطای خود ترموکوپل باشد.

استفاده از مانع نوار تابیدهٔ ساده در مرحلهٔ بعدی آزمایش در دستور کار قرار گرفت و نتایج آن با حالت بدون مانع که در قسمت قبل انجام گرفت مقایسه شد.

جدول (۷) عدد ناسلت متوسط و ضریب اصطکاک متوسط را برای دو لولهٔ با و بدون مانع نوار تابیدهٔ ساده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود عدد ناسلت متوسط برای لولهٔ با مانع نوار تابیده تفاوت زیادی با لولهٔ بدون مانع دارد. برای داده‌های آزمایشگاهی، مطابق جدول حداکثر مقدار ۱/۳۹ برای کارایی مشاهده می‌شود که در نتیجهٔ استفاده از موانع در لوله‌ها توصیه می‌شود اما یکی از نقاط ضعف استفاده از موانع، افزایش قابل توجه افت فشار می‌باشد. همان‌طور که جدول (۷) نشان می‌دهد، برای نتایج آزمایشگاهی ضریب اصطکاک متوسط لوله با مانع حدود ۱۱/۶۷ برابر نسبت‌به لولهٔ بدون مانع افزایش یافته‌است.

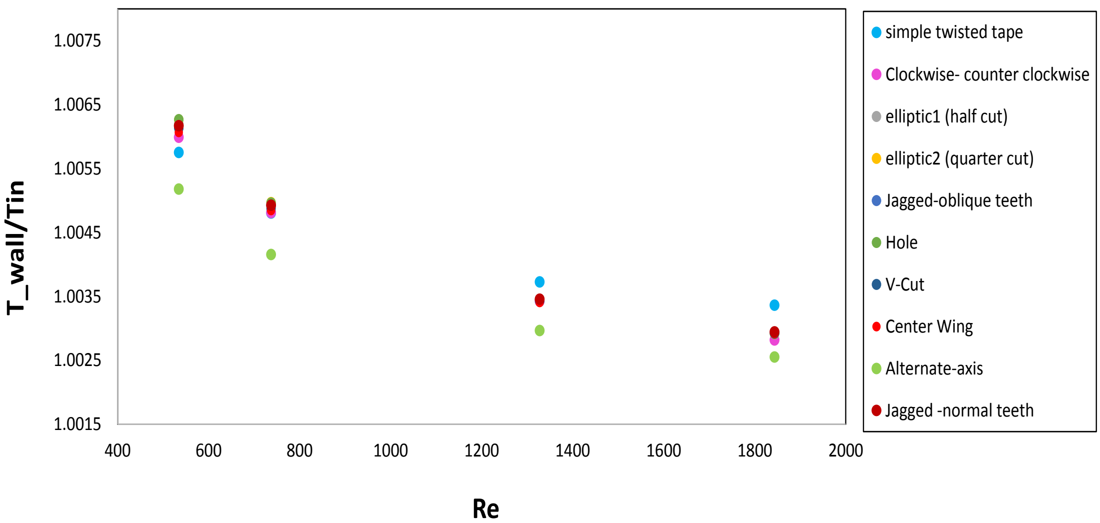
## نتایج مدل‌سازی عددی

باتوجه به هزینه های بالای مواد و لوازم مصرفی، تجهیزات مورد نیاز، تولید نوار های تابیده و انجام آزمایش ها، بررسی انواع نوار های تابیده و انتخاب بهترین نوار تابیده به‌صورت عددی انجام خواهد شد؛ لذا به‌منظور صحه‌گذاری مدل‌سازی عددی، بستر آزمایِ شگاهی برای انجام آزمایش‌های لولهٔ صافِ بدون و با نوار تابیدهٔ ساده آماده گردید.

پس از صحه‌گذاری مدل عددی، بررسی عددی ده نوع نوار تابیدهٔ منتخب (با اشکال مختلف) در شرایط یکسان انجام و بهترین نوار تابیده (دارای بالاترین کارایی) انتخاب می‌شود.

میانگین دمای نسبی دیوارهٔ لوله برای ده نوع مانع مختلف در شکل (۷) مورد بررسی قرار گرفته‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییر نوارهای تابیدهٔ مذکور تأثیر کمی بر دمای متوسط دیوارهٔ لوله دارد. برای مثال دمای سطح لوله در عدد رینولدز ۷۳۷ برای تمامی ده مدل مانع حدوداً ٤ درصد تغییرات دارد. پایین‌ترین دمای سطح در تمامی اعداد رینولدز مربوط به نوار تابیده با بریدگی دندانه‌عمودی می‌باشد.

در ادامه جدول (۸) ارائه شده‌است که مقادیر کارایی، عدد ناسلت متوسط و ضریب اصطکاک را برای ده مدل مانع نوار تابیده با نسبت پیچش ۳/۱ در عدد رینولدز ۱۳۲۷ و شار حرارتی ۱۳۸۰ وات بر متر مربع گزارش کرده‌است.




شکل ۷ نمودار نسبت دمای متوسط سطح لوله به دمای ورودی سیال برای ده مانع نوار تابیده مورد بررسی برحسب عدد رینولدز

جدول ۸ مقایسهٔ عدد ناسلت متوسط، ضریب اصطکاک و کارایی ۱۰ مدل مختلف نوار تابیده در نتایج عددی در شار حرارتی۱۳۸۰ وات بر مترمربع و عدد رینولدز ۱۳۲۷

| # | مدل مانع | $Nu_{ave}$ | f | TPF |
|---|---|---|---|---|
| 1 | نوار تابیدهٔ ساده | 22.53 | 0.56 | 1.10 |
| 2 | نوار تابیدهٔ ساعتگرد– پادساعتگرد | 25.33 | 0.30 | 1.56 |
| 3 | نوار تابیده با بریدگی بیضوی ۱ | 25.48 | 0.33 | 1.49 |
| 4 | نوار تابیده با بریدگی بیضوی ۲ | 25.51 | 0.33 | 1.49 |
| 5 | نوار تابیده با بریدگی دندانه‌مورب | 25.51 | 0.38 | 1.42 |
| 6 | نوار تابیدهٔ سوراخ‌دار | 25.63 | 0.33 | 1.49 |
| 7 | نوار تابیده با بریدگی v شکل | 25.85 | 0.33 | 1.51 |
| 8 | نوار تابیده با بریدگی بال دلتا شکل در مرکز | 26.00 | 0.36 | 1.47 |
| 9 | نوار تابیدهٔ محور متناوب | 32.44 | 0.68 | 1.53 |
| 10 | نوار تابیده با بریدگی دندانه‌عمودی | 25.74 | 0.39 | 1.41 |

برای بررسی هم‌زمان عدد ناسلت و ضریب اصطکاک، متغیری به نام کارایی تعریف شده‌است. این پارامتر با نام ضریب ترمو هیدرولیکی نیز شناخته می‌شود که عملکرد هرکدام از نوارهای تابیده را نشان می‌دهد (رابطهٔ ۹). در ابتدا مشاهده می‌شود که نوار تابیدهٔ ساده به‌خاطر ضریب اصطکاک زیاد سیال در لوله، مقدار کارایی کمتری نسبت‌به لولهٔ بدون مانع دارد، بنابراین ارزیابی نوارهای تابیدهٔ دیگر اهمیت زیادی دارد. با وجود این‌که نوار تابیدهٔ محور متناوب بالاترین مقدار عدد ناسلت (۳۲/٤٤) را دارد اما، نوار تابیدهٔ ساعتگرد– پادساعتگرد بیشترین مقدار کارایی (۱/٥٦) را دارد. این بدین معنی است که استفاده از نوار تابیدهٔ ساعتگرد– پادساعتگرد به نسبت سایر نوارهای تابیدهٔ مورد بررسی کاراتر و مؤثرتر است.

## بخش دوم

در این بخش تأثیر نوار تابیدهٔ منتخب با بالاترین کارایی (نوع ساعتگرد– پادساعتگرد) بر عملکرد حرارتی و الکتریکی سامانه‌های فتوولتاییک حرارتی بررسی می‌شود. استفاده از سامانهٔ فتوولتاییک حرارتی با نوار تابیده یک روش نیمه‌فعال برای بهبود کارایی صفحهٔ فتوولتاییک به‌شمار می‌رود. در این بخش تحت شرایط درون آزمایشگاهی(با شبیه‌ساز خورشیدی)، سه سامانهٔ فتوولتاییک بدون خنک‌کاری، سامانهٔ فتوولتاییک حرارتی و سامانهٔ فتوولتاییک حرارتی با نوار تابیده تحت تابش‌های ثابت ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ وات بر متر مربع و نرخ حجمی سیال کاری ۱۳۰ لیتر بر ساعت با یکدیگر مقایسه می‌شوند (جدول ۹). لازم به توضیح است به‌منظور به حداقل رساندن تأثیر محیط و شرایط آزمایشگاهی بر نتایج آزمایش‌ها، دمای محیط آزمایشگاه به‌کمک یک سیستم تهویهٔ مطبوع، ثابت نگه داشته شده‌است.

سامانهٔ فتوولتاییک حرارتی با نوار تابیده به‌دلیل جذب گرمای بیشتر، کمترین میانگین دمای سطح را تجربه می‌کند. به‌عنوان مثال در تابش ۳۰۰ و ۹۰۰ وات بر متر مربع سامانه با نوار تابیده می‌تواند دمای فتوولتاییک بدون خنک‌کاری را حدود ۱۳/٤ و ۲٤/٦ درجهٔ سانتی‌گراد کاهش دهد. دلیل اصلی کاهش بیشتر دما در حالت با نوار تابیده، ایجاد آشفتگی در جریان سیال خنک‌کننده و درنتیجه جذب گرمای بیشتر از سطح فتوولتاییک است.

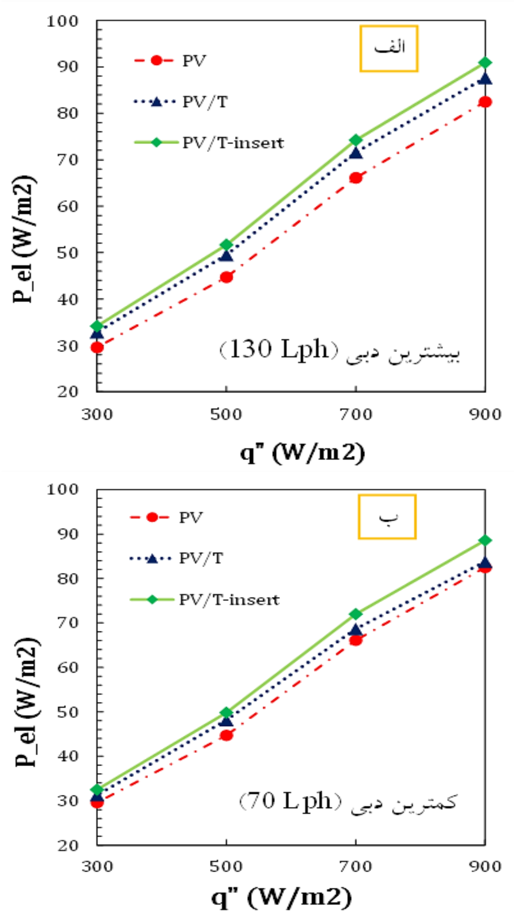
جدول ۹ دمای سطح بر حسب تابش برای سه سامانهٔ مختلف مورد مطالعه در دبی ۱۳۰ لیتر بر ساعت

| q" (W/m2) | PV | PV/T | PV/T-insert |
|---|---|---|---|
| 900 | 76.7 | 56.7 | 55.3 |
| 700 | 74.5 | 53 | 51.8 |
| 500 | 57.5 | 45.2 | 43.5 |
| 300 | 47.3 | 37.5 | 37 |

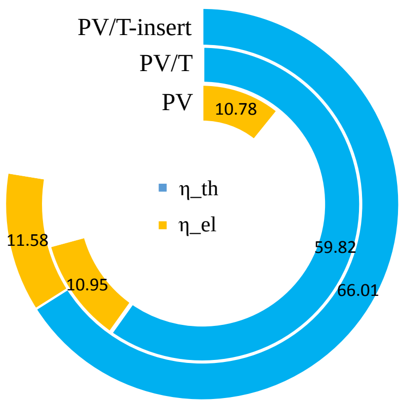
شکل (۸- الف) توان الکتریکی برحسب تابش در دبی ۱۳۰ لیتر بر ساعت و شکل (۸- ب) توان الکتریکی در دبی ۷۰ لیتر برساعت را برای سه سامانهٔ مورد مطالعه نشان می‌دهد. بر اساس نتایج شکل‌ها، با افزایش تابش از ۳۰۰ تا ۹۰۰ وات بر متر مربع، در تمامی سامانه‌های مورد بررسی، توان الکتریکی کاهش می‌یابد. این پدیده گواه این مدعا است که دمای سطح و توان الکتریکی رابطهٔ کاملاً معکوس دارند. این نتیجه در بسیاری از پژوهش‌ها اشاره شده‌است [33,34]. در دبی بیشینه، در تابش ۳۰۰ وات بر متر مربع توان الکتریکی سامانه مجهز به نوار تابیده حدود ۳/۸۸ و ۱۳/۳۸ درصد نسبت‌به سامانهٔ بدون نوار و بدون گردآورنده بیشتر است. هم‌چنین در تابش ۹۰۰ وات بر متر مربع توان الکتریکی سامانه مجهز به نوار تابیده حدود ۳/۷۲ و ۹/۲۸ درصد نسبت سامانه بدون نوار و بدون گردآورنده بیشتر است.

نتایج موجود در شکل (۹) تحت تابش ۹۰۰ وات بر متر مربع و نرخ حجمی سیال کاری ۷۰ لیتر بر ساعت محاسبه شده است. در مقایسهٔ دو سامانه با و بدون نوار تابیده نتایج نشان می‌دهد راندمان گرمایی (بازده الکتریکی) ٦/٢ درصد (٠/٦٢ درصد) بهبود را تجربه می‌کند. هم‌چنین این شکل نشان می‌دهد استفادهٔ هم‌زمان از نوار تابیده و گردآورنده بازده الکتریکی را حدود ۰/۸ درصد افزایش می‌دهد.

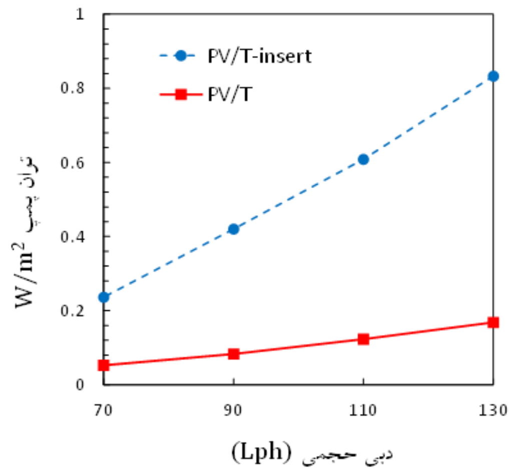
شکل (۱۰) توان مصرفی پمپ در دبی های مختلف را نشان می‌دهد. مطابق شکل، افزایش دبی سیال عامل، افزایش توان مصرفی پمپ را به‌دنبال دارد. با مقایسهٔ شکل (۸) و شکل (۱۰) می‌توان دریافت که توان مصرفی پمپ در مقایسه با توان الکتریکی سامانه فوتوولتاییک حرارتی بسیارناچیز است؛ لذا می‌توان از آن صرف‌نظر کرد.




شکل ۸ توان الکتریکی بر حسب تابش در الف) بیشترین دبی، ب) کمترین دبی




شکل ۹ بازده الکتریکی و گرمایی برای سامانه‌های مورد مطالعه در دبی ۷۰ لیتر بر ساعت و شار ورودی ۹۰۰ وات بر مترمربع




شکل ۱۰ نمودار توان مصرفی پمپ در دبی‌های مختلف برای دو سامانهٔ با و بدون مانع

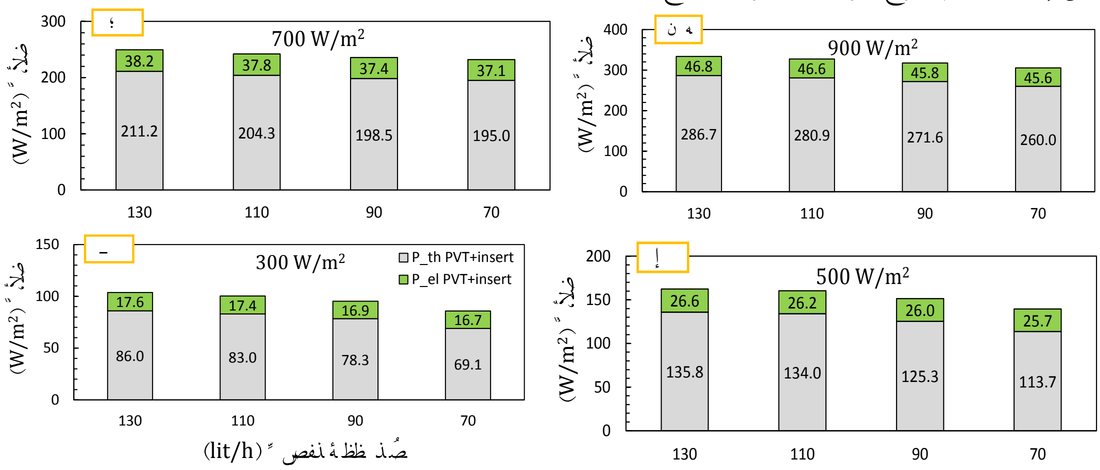
به‌منظور مقایسهٔ بهتر، شکل (۱۱) توان‌های الکتریکی و گرمایی در تابش‌های (۳۰۰ تا ۹۰۰ وات بر متر مربع) و نرخ‌های حجمی مختلف (۷۰ تا ۱۳۰ لیتر بر ساعت) در سامانهٔ مجهز به نوار تابیدهٔ منتخب را نشان می‌دهد. نکات زیر از شکل گزارش‌شده برداشت می‌شود:

۱. در تابش ثابت با افزایش نرخ حجمی سیال کاری، هم توان الکتریکی و هم توان گرمایی بهبود می‌یابند. دلیل این پدیده جذب نرخ گرمای بیشتر از سطح توسط سیال کاری است.

۲. در نرخ حجمی سیال کاری ثابت با افزایش تابش، توان الکتریکی به‌دلیل بالا رفتن شار ورودی افزایش و توان گرمایی به‌دلیل جذب گرمای بیشتر، افزایش را تجربه می‌کند. بنابراین بیشترین توان الکتریکی و گرمایی در بیشترین سرعت سیال و بیشترین تابش رخ می‌دهد.

۳. در کمترین دبی حجمی، با افزایش شدت تابش از ۳۰۰ تا ۹۰۰ وات بر متر مربع، توان الکتریکی و گرمایی حدود ۱۷۲/۵ و ۲۷٦/۵ درصد افزایش دارد. هم‌چنین در بیشترین دبی حجمی نیز، با افزایش شدت تابش از ۳۰۰ تا ۹۰۰ وات بر متر مربع، توان الکتریکی و گرمایی حدود ۱٦٦/۳ و ۲۳۳/۳ درصد افزایش دارد.

٤. در کمترین شدت تابش اعمالی، با افزایش دبی حجمی از ۷۰ تا ۱۳۰ لیتر برساعت، توان الکتریکی و گرمایی حدود ۵/۰ و ۲٤/۵ درصد افزایش دارد. هم‌چنین در بیشترین شدت تابش اعمالی، با افزایش دبی حجمی از ۷۰ تا ۱۳۰ لیتر برساعت نیز، توان الکتریکی و گرمایی حدود ۲/۷ و ۱۰/۳ درصد افزایش دارد.




شکل ۱۱ توان الکتریکی و گرمایی در تابش‌ها (۳۰۰ تا ۹۰۰ وات بر متر مربع) و نرخ‌های حجمی مختلف (۷۰ تا ۱۳۰ لیتر بر ساعت) در سامانهٔ مجهز به نوار تابیدهٔ منتخب

## نتیجه‌گیری

برخی از مهم‌ترین نتایج به شرح زیر می‌باشند:

۱. بستر آزمایشگاهی برای بررسی اثر استفاده از نوار تابیده در لوله تهیه شد. سپس مدل‌سازی عددی با مدل آزمایشگاهی صحت‌سنجی شد.

۲. استفاده از نوار تابیدهٔ ساده سبب حداکثر مقدار ۱/۳۹ برای کارایی مشاهده می‌شود بنابراین استفاده از موانع در لوله‌ها توصیه می‌شود.

۳. در بین ده مانع نوار تابیدهٔ مختلف، نوار تابیدهٔ ساعتگرد- پادساعتگرد دارای بالاترین مقدار کارایی است و به‌عنوان بهترین مانع برگزیده شده‌است.

٤. مقایسهٔ نتایج دو سامانهٔ با و بدون نوار تابیده در شار ورودی ۹۰۰ وات بر مترمربع و ۷۰ لیتر بر ساعت نشان می‌دهد که بازده گرمایی (بازده الکتریکی) ٦/۲ درصد (۰/٦۲ درصد) بهبود را تجربه می‌کند.

۵. در تابش ثابت با افزایش نرخ حجمی سیال کاری، هم توان الکتریکی و هم توان گرمایی بهبود می‌یابند. دلیل این پدیده جذب نرخ گرمای بیشتر از سطح توسط سیال کاری است.

٦. در کم‌ترین دبی حجمی، با افزایش شدت تابش از ۳۰۰ تا ۹۰۰ وات بر متر مربع، توان الکتریکی و گرمایی حدود ۱۷۲/۵ و ۲۷٦/۵ در صد افزایش دارد. هم‌چنین در بیشترین دبی حجمی نیز، با افزایش شدت تابش از ۳۰۰ تا ۹۰۰ وات بر متر مربع، توان الکتریکی و گرمایی حدود ١٦٦/۳ و ۲۳۳/۳ درصد افزایش دارد.

## واژه نامه

| | |
|---|---|
| نوار تابیده سوراخ‌دار | Perforated twisted tape |
| نوار تابیده شکاف‌دار | Notched twisted tape |
| نوار تابیده سیم‌دار | Wired twisted tape |
| دارای بریدگی Vشکل | V-cut |
| چند کاناله | Multi-channel |
| با محور متغیر | With alternative axis |
| دانданه‌دار | Serrated |
| خوشه‌ای آج‌دار | Ribbed spiky |
| با حلقه‌های دایره‌ای | With circular-rings |
| سطح ناهموار و نامتناوب | Staggered |
| مانع برگ مخروطی | Conical leaf insert |

## فهرست علائم

| | |
|---|---|
| P | فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$) |
| Pr | عدد پرانتل |
| Re | عدد رینولدز |
| $\dot{E}$ | نرخ انرژی (W) |
| $\dot{G}$ | نرخ تابش خورشید ($Wm^{-2}$) |
| $\dot{m}$ | دبی جرمی ($kgs^{-1}$) |
| q'' | شار حرارتی ($Wm^{-2}$) |
| $C_p$ | ظرفیت گرمایی ویژه ($Jkg^{-1}K^{-1}$) |
| h | ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ($Wm^{-2}K^{-1}$) |
| Nu | عدد ناسلت |
| u | سرعت در جهت x ($ms^{-1}$) |
| v | سرعت در جهت y ($ms^{-1}$) |
| w | سرعت در جهت z ($ms^{-1}$) |
| T | دما (K) |
| TPF | کارایی |
| D | قطر لوله (m) |
| A | مساحت ($m^2$) |
| L | طول لوله (m) |
| FF | ضریب انباشتگی سطح فوتوولتاییک |
| V | ولتاژ (v) |
| I | جریان (A) |
| $\eta$ | بازده (%) |
| f | ضریب اصطکاک جریان داخل لوله |
| g | شتاب گرانش ($ms^{-2}$) |

## علائم یونانی

| | |
|---|---|
| $\rho$ | چگالی ($kgm^{-3}$) |
| $\mu$ | لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$) |
| k | رسانندگی حرارتی ($Wm^{-1}K^{-1}$) |

## زیرنویس‌ها

| | |
|---|---|
| s | سطح |
| B | حجم (بالک) سیال |
| t | اغتشاش |
| in | ورودی |
| out | خروجی |
| el | الکتریکی |
| th | حرارتی (گرمایی) |
| f | سیال |
| mass | جرمی |
| p | پمپ |
| amb | محیط |
| insert | نوار تابیدهٔ ساده |
| smooth | صاف (بدون مانع) |
| ref | مبنا |

## مراجع


1. Yazdanpanahi, J., Sarhaddi, F., and Adeli, M. M., "Experimental Investigation of Exergy Efficiency of a Solar Photovoltaic Thermal (PVT) Water Collector Based on Exergy Losses", *Solar Energy*, Vol. 118, Pp. 197-208, (2015).
2. Rashidi, S., Hossein Kashefi, M., and Hormozi, F., "Potential Applications of Inserts in Solar Thermal Energy Systems – A Review to Identify the Gaps and Frontier Challenges", *Solar Energy*, Vol. 171, Pp. 929-952, doi: https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.07.017, (2018).
3. Taheri, A., Malayjerdi, M., Kazemi, M., Kalani, H., Nemati-Farouji, R., Passandideh-Fard, M., and Sardarabadi, M., "Improving the Performance of a Nanofluid-Based Photovoltaic Thermal Module Utilizing Dual-Axis Solar Tracker System: Experimental Examination and Thermodynamic Analysis", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 196, Pp. 117178, (2021).
4. Dupeyrat, P., Menezo, C., and Fortuin, S., "Study of the Thermal and Electrical Performances of PVT Solar hot Water System", *Energy and Buildings*, Vol. 68, Pp. 751-755, (2014).
5. Chandrasekar, M., Suresh S., and Senthilkumar, T., "Passive Cooling of Standalone flat PV Module with Cotton Wick Structures", *Energy Conversion and Management*, Vol. 71, Pp. 43-50, (2013).
6. Browne, M., Norton, B., and McCormack, S., "Phase Change Materials for Photovoltaic Thermal Management", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 47, Pp. 762-782, (2015).
7. Chow, T. T., "A Review on Photovoltaic/Thermal Hybrid Solar Technology", *Applied Energy*, Vol. 87, No. 2, Pp. 365-379, (2010).
8. Maadi, S. R., Sabzali, H., Kolahan, A., and Wood, D., "Improving the Performance of PV/T Systems by Using Conical-Leaf Inserts in the Coolant Tubes", *Solar Energy*, Vol. 212, Pp. 84-100, (2020).

9. Hafez, A. Z., Attia, A. M., Eltwab, H. S., ElKousy, A. O., Afifi, A. A., AbdElhamid, A. G., AbdElqader, A. N., Fateen, S. E. K., El-Metwally, K. A., Soliman, A., and Ismail, I. M., "Design Analysis of Solar Parabolic Trough Thermal Collectors", *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* Vol. 82, Pp. 1215-1260, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.010, (2018).
10. Joshi, S. S., and Dhoble, A. S., "Photovoltaic-Thermal Systems (PVT): Technology Review and Future Trends", *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* Vol. 92, Pp. 848-882, (2018).
11. Anbu, S., Venkatachalapathy, S., Suresh, S. J. J. o. T. A., and Calorimetry, "Convective Heat Transfer Studies on Helically Corrugated Tubes with Spiraled Rod Inserts Using TiO 2/DI Water Nanofluids", Vol. 137, No. 3, Pp. 849-864, (2019).
12. Bahiraei, M., Mazaheri, N., and Hassanzamani, S. M. J. I. J. o. M. S., "Efficacy of a New Graphene–Platinum Nanofluid in Tubes Fitted with Single and Twin Twisted Tapes Regarding Counter and Co-*Swirling Flows for Efficient Use of Energy*", Vol. 150, Pp. 290-303, (2019).
13. Nakhchi, M. E., and Esfahani, J. A., "Cu-Water Nanofluid Flow and Heat Transfer in a Heat Exchanger Tube Equipped with Cross-Cut Twisted Tape", *Powder Technology,* Vol. 339, Pp. 985-994, (2018).
14. Bahiraei, M., Gharagozloo, K., and Moayedi, H., "Experimental Study on Effect of Employing Twisted Conical Strip Inserts on Thermohydraulic Performance Considering Geometrical Parameters", *International Journal of Thermal Sciences,* Vol. 149, Pp. 106178, (2020).
15. Datt, R., Bhist, M. S., Kothiyal, A. D., Maithani, R., and Kumar, A., "Fluid Flow and Heat Transfer Enhancement in Wings with Combined Solid Ring Twisted Tape Inserts Circular Heat Exchanger Tube", *Thermal Science,* No. 00, Pp. 95-95, (2019).
16. Liu, H.-l., Li, H., He, Y.-l., and Chen, Z.-t., "Heat Transfer and Flow Characteristics in a Circular Tube Fitted with Rectangular Winglet Vortex Generators", *International Journal of Heat and Mass Transfer,* Vol. 126, Pp. 989-1006, (2018).
17. Sadeghi, O., Mohammed, H., Bakhtiari-Nejad, M., and Wahid, M., "Heat Transfer and Nanofluid Flow Characteristics through a Circular Tube Fitted with Helical Tape Inserts", *International Communications in Heat and Mass Transfer,* Vol. 71, Pp. 234-244, (2016).
18. Chang, S. W., Cai, W. L., and Syu, R. S., "Heat Transfer and Pressure Drop Measurements for Tubes Fitted with Twin and Four Twisted Fins on Rod", *Experimental Thermal and Fluid Science,* Vol. 74, Pp. 220-234, (2016).
19. Skullong, S., Promvonge, P., Thianpong, C., and Pimsarn, M., "Heat Transfer and Turbulent Flow Friction in a Round Tube with Staggered-Winglet Perforated-Tapes", *International Journal of Heat and Mass Transfer,* Vol. 95, Pp. 230-242, (2016).
20. Liu, G., Yang, C., Zhang, J., Zong, H., Xu, B., and Qian, J. -y., "Internal Flow Analysis of a Heat Transfer Enhanced Tube with a Segmented Twisted Tape Insert", *Energies,* Vol. 13, No. 1, Pp. 207,

(2020).

21. Moghaddaszadeh, N., Esfahani, J. A., and Mahian, O., "Performance Enhancement of Heat Exchangers Using Eccentric Tape Inserts and Nanofluids", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 137, No. 3, Pp. 865-877, (2019).
22. Huang, Z. F., Nakayama, A., Yang, K., Yang, C., and Liu, W., "Enhancing Heat Transfer in the Core Flow by Using Porous Medium Insert in a Tube", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No. 5, Pp. 1164-1174, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.10.038, (2010).
23. Abdul Hamid, K., Azmi, W. H., Mamat, R., and Sharma, K. V., "Heat Transfer Performance of $TiO_2$–$SiO_2$ Nanofluids in a Tube with Wire Coil Inserts", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 152, Pp. 275-286, doi: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.083, (2019).
24. Pethkool, S., Eiamsa-ard, S., Kwankaomeng, S., and Promvonge, P., "Turbulent Heat Transfer Enhancement in a Heat eExchanger Using Helically Corrugated Tube", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 3, Pp. 340-347, doi: https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.11.014, (2011).
25. Chang, S. W., Chen, T. W., and Chen, Y. W., "Detailed Heat Transfer and Friction Factor Measurements for Square Channel Enhanced by Plate Insert with Inclined Baffles and Perforated Slots", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 159, Pp. 113856, doi: https//:doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113856, (2019).
26. Kumar, D., Patil, A. K., and Kumar, M., "Experimental Investigation of Heat Transfer and Fluid Flow in a Circular Tube with Lanced Ring Insert", *Experimental Heat Transfer*, Vol. 33, No. 6, Pp. 560-571, (2020).
27. Gnanavel, C., Saravanan, R., and Chandrasekaran, M., "Heat Transfer Augmentation by Nano-Fluids and Spiral Spring Insert in Double Tube Heat Exchanger– A Numerical Exploration", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 21, Pp. 857-861, doi: https://doi.org/10,1016/j.matpr.2019.07.602, (2020).
28. Bejan, A., *Convection Heat Transfer*: Wiley, (2013).
29. Yazdanifard, F., Ebrahimnia-Bajestan, E., and Ameri, M., "Investigating the Performance of a Water-Based Photovoltaic/Thermal (PV/T) Collector in Laminar and Turbulent Flow Regime", Renewable Energy, (2016).
30. Dubey, S., and Tay, A. A., "Testing of Two Different Types of Photovoltaic–Thermal (PVT) Modules with Heat Flow Pattern under Tropical Climatic Conditions", *Energy for Sustainable Development*, Vol. 17, No. 1, Pp. 1-12, (2013).
31. Maadi, S. R., Khatibi, M., Ebrahimnia-Bajestan, E., and Wood, D., "Coupled Thermal-Optical Numerical Modeling of PV/T Module– Combining CFD Approach and Two-Band Radiation DO Model", *Energy Conversion and Management*, Vol. 198, Pp. 111781, (2019).

32. Kalateh, M. R., Kianifar, A., and Sardarabadi, M., "A Three-Dimensional Numerical Study of the Effects of Various Twisted Tapes on Heat Transfer Characteristics and Flow Field in a Tube: Experimental Validation and Multi-Objective Optimization Via Response Surface Methodology", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 50, Pp. 101798, (2022).
33. Taheri, A., Malayjerdi, M., Kazemi, M., Kalani, H., Nemati-Farouji, R., Passandideh-Fard, M., and Sardarabadi, M., "Improving the Performance of a Nanofluid-Based Photovoltaic Thermal Module Utilizing Dual-Axis Solar Tracker System: Experimental Examination and Thermodynamic Analysis", Applied Thermal Engineering, Vol. 196, Pp. 117178, doi: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117178, (2021).
34. Salari, A., Taheri, A., Farzanehnia, A., Passandideh-fard, M., and Sardarabadi, M., "An Updated Review of the Performance of Nanofluid-Based Photovoltaic Thermal Systems from Energy, Exergy, Economic, and Environmental (4E) Approaches", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 282, Pp. 124318, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124318, (2021).
35. Menter, F. R., Kuntz, M., and Langtry, R., "Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model", *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, Vol. 4, No. 1, Pp. 625-632, (2003).
36. Maadi, S. R., Navegi, A., Solomin, E., Ahn, H. S., Wongwises, S., and Mahian, O., "Performance Improvement of a Photovoltaic-Thermal System Using a Wavy-Strip Insert with and without Nanofluids", *Energy*, Pp. 121190, (2021).

# Experimental and Numerical Study of the Effects of Using Selected Twisted Tapes Insert on the Performance of Photovoltaic Thermal System

Mohammad Reza Kalateh[1] Ali Kianifar[2]
Mohammad Sardarabadi[3]

## 1. Introduction

Various active, passive, and semi-active/passive methods have been utilized to further augment the electrical/thermal performance of photovoltaic thermal systems (PV/Ts) such as using mini-channel heat pipes, integration of phase change materials (PCMs), using thermoelectric coolers, replacing nanofluids with typical pure fluids, changing the configuration of the attached thermal collectors, using inserts in the collector tubes, and utilizing solar tracker systems.

Throughout past years, using numerical and experimental methods, implementing inserts, as one of the passive heat transfer enhancement techniques, in various applications such as straight/curve tubes, heat exchangers, solar thermal collectors, and PV/Ts have been subjected to rigorous examinations. Using inserts helps to hydrodynamic/thermal boundary layer reduction, increasing flow mixing, and heat transfer coefficient increment. In addition, due to the tremendous progress in the manufacturing process, using inserts can be easily implemented in industrial scales. This method has been used by many researchers in order to improve the solar systems efficiency.

Amongst all inserts, twisted tapes are more popular and practical thanks to their easy installation and economical aspects. Sheikholeslami and Farshadab carried out a 3D numerical study based on controlling volume method to investigate the combination of two various heat transfer techniques of using lobed tube and twisted tape tabulator in a solar thermal collector. Respectively, 17.9 and 12.7%, were obtained for reduction of exergy loss and promotion in convective heat transfer coefficient, by replacing the lobed tube with turbulator instead of a conventional circular tube.

Throughout the reviewed studies, applying inserts in solar thermal collectors is a useful, simple and commercial way to help more heat transfers from the collector to the operating fluid. Consequently, thermal efficiency of these systems will be enhanced. However, the influence of using inserts on the PVTs have received less attention, numerically and experimentally. Therefore, in this study, through designing and fabricating three different systems (PV unit, conventional PV/T, and PV/T integrated with clockwise-counter clockwise twisted tapes (CWCCW)), the effects of inserts on these systems are examined in an indoor experimental condition by simulating different outdoor conditions. The mentioned type of insert was the best optimum insert among ten different twisted tape inserts.

## 2. Experimental setup

In this part, three different photovoltaic systems are designed and built. The first system is a typical photovoltaic unit without any cooling system. The second system is a thermal photovoltaic unit with a header-riser collector installed below the photovoltaic panel. The third system is the same as the second one, with clockwise-counterclockwise twisted insert inside the tubes. The collector consists of 21 tubes. All experiments are done using a solar simulator system.

Solar simulator consists of eight 500-watts halogen lamps. By adjusting the angle of each lamp, the flux is tried to be the same on all surface (difference of the flux in all the surface is less than 10 W/m$^2$).

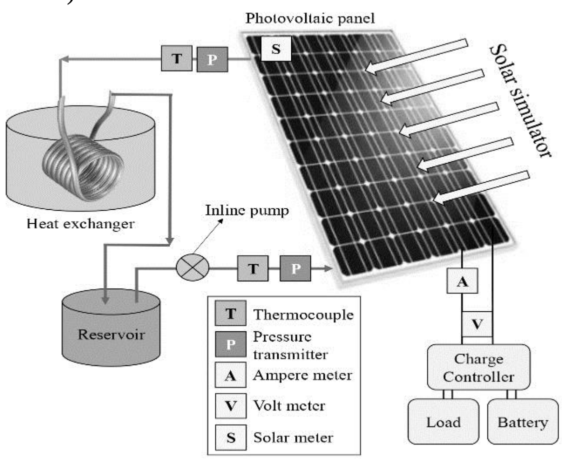



**Figure 1. Schematic of experimental setup**

## 3. Results and discussion

Table 1 shows the numerical values of average Nu number, friction factor and TPF, at the Re number of 1327 for the following twisted tapes (TTs): simple, perforated, V-cut, two different elliptic-cut, clockwise-counterclockwise, jagged oblique and normal teeth, center-delta wing, and alternate axis. As seen in the table, by implementing the

[1]. Ph.D. student, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
[2]. Corresponding Author :Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: a-kiani@um.ac.ir
[3]. Assistant professor, Department of Energy, Quchan University of Technology, Quchan, Iran.

clockwise-counterclockwise TT insert, the Nu number reaches a maximum value of 1.56, more than the other ones. Thus, this insert is selected as the best TT insert.

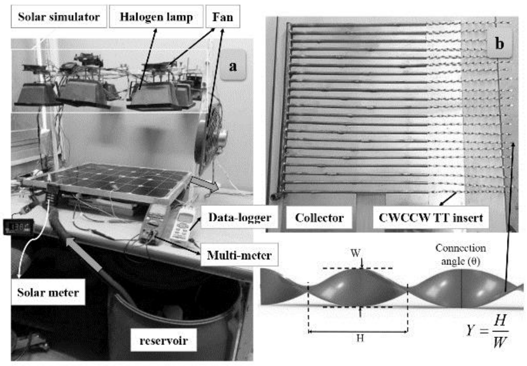



**Figure 2. A real image of experimental setup**

**Table 1. Nu number, friction factor and TPF of ten studied twisted tape inserts**

| Type of twisted tape | $Nu_{ave}$ | f | TPF |
|---|---|---|---|
| Simple TT | 22.53 | 0.56 | 1.10 |
| Clockwise-counterclockwise | 25.33 | 0.30 | 1.56 |
| Elliptic-cut 1 | 25.48 | 0.33 | 1.49 |
| Elliptic-cut 2 | 25.51 | 0.33 | 1.49 |
| Jagged oblique teeth | 25.51 | 0.38 | 1.42 |
| Perforated | 25.63 | 0.33 | 1.49 |
| V-cut | 25.85 | 0.33 | 1.51 |
| Center-delta wing | 26.00 | 0.36 | 1.47 |
| Alternate axis | 32.44 | 0.68 | 1.53 |
| Jagged normal teeth | 25.74 | 0.39 | 1.41 |

PV/T with selected TT insert experiences the lowest average surface temperature due to a higher heat absorption. For example, at 300 and 900 W/m$^2$, the PV/T- insert system can reduce the PV surface temperature by 13.4 and 24.6 degrees Celsius. The main reason for further temperature drops in the PV/T-insert is turbulence in the coolant fluid flow and more heat absorption from the photovoltaic surface compared to that of the conventional PV/T.

**Table 2. Surface temperature in terms of solar irradiance for three different studied systems at 130 lit/h**

| q" (W/m$^2$) | PV | PV/T | PV/T-insert |
|---|---|---|---|
| 900 | 76.7 | 56.7 | 55.3 |
| 700 | 74.5 | 53 | 51.8 |
| 500 | 57.5 | 45.2 | 43.5 |
| 300 | 47.3 | 37.5 | 37 |

The results show in Figure 3 are obtained from 900 W/m$^2$ per and the volume flow rate of 70 lit/h. Comparing the PV/T-insert with PV/T system, the results show that thermal efficiency (and electrical efficiency) improves by 6.2% (0.62%). The figure also shows that the simultaneous use of the tapes and the collector increases the electrical efficiency by about 0.8%.

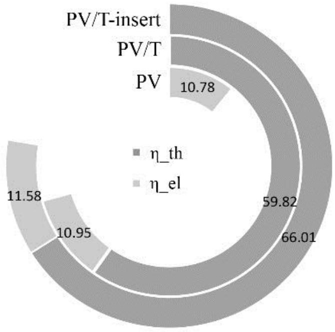



**Figure 3. Electrical and thermal efficiencies for the systems at 70 lit/h and an input flux of 900 W/m$^2$**

## 4. Conclusion

The most important results are as follow:

- The use of simple TT inserts increases efficiency about 1.39; so the use of insert in tubes is recommended;
- Among ten different inserts, the clockwise-counterclockwise TT insert had the highest thermal performance factor and was selected as the best insert;
- Comparison the results of the PV/T and PV/T-insert at heat flux of 900 W/m$^2$ and the mass flow rate of 70 lit/h showed increasing of the thermal efficiency (and the electrical efficiency) by 6.2% (and 0.62%).
- In a constant to solar irradiance, both electric power and heat power are improved by increasing the mass flow rate of the working fluid;